



BİYOLOJİK TEMEL İŞLEMLER

Biyolojik Arıtma Sistemlerinin Stokiyometri ve Kinetiği II

Prof.Dr. Özer ÇINAR
Yıldız Technical University
Department of Environmental Engineering
İstanbul, Turkey

Geri Dönüşümsüz ve Tam Karışımli Askıda Büyüyen Prosesler

- Bu tür prosesler havalandırmalı lagün ya da doldur boşalt reaktör olarak da bilinir.
- Bu sistemler için gerekli denklemleri bulabilmek için hem mikroorganizma hem de substrat için kütle dengesi yapmak gerekir.

Mikroorganizma için Kütle Dengesi

- Geri devirsiz ve tam karışımlı askıda büyüyen bir proseste mikroorganizma için kütle dengesi şu şekilde yapılır:

Net Birikim = Giriş m.o. konsantrasyonu - Çıkış m.o. konsantrasyonu + Net büyüme

Mikroorganizma için Kütle Dengesi

- Kütle dengesi açık bir şekilde yazılırsa eşitlik şu şekilde olur:

$$\frac{dX}{dt} V = QX_0 - QX + r_g V \quad (19)$$

- dX/dt = biyokütle konsantrasyonunun değişim hızı, gr uçucu askıda katı (VSS)/m³-gün
- V = reaktör hacmi (havalandırma havuzu), m³
- Q = giriş atıksu debisi, m³/gün
- X_0 = giriş biyokütle konsantrasyonu, gr VSS/m³
- r_g = bakteriyel büyüme hızı, gr VSS/m³-gün

Mikroorganizma için Kütle Dengesi

- (19) denkleminde mikrobiyal kütlenin aktif kısmını ifade eden toplam askıda katı maddenin uçucu askıda katı kısmı kullanılır. (19) denkleminde r_g ifadesi yerine (12) denklemindeki karşılığı yazılacak olursa denklem şu şekli alır:

$$\frac{dX}{dt}V = QX_0 - QX + V\left(\frac{\mu_m XS}{K_s + S} - k_d X\right) \quad (20)$$

- Kararlı durumda $dX/dt = 0$ alınabilir.
- Bunun yanı sıra giriş mikroorganizma konsantrasyonu çok düşük olduğundan ihmal edilebilir.

Mikroorganizma için Kütle Dengesi

- Bu durumlar göz önüne alınır ve eşitliğin her iki tarafı X'e bölünürse denklem aşağıdaki gibi gerçekleşir:

$$\frac{Q}{V} = \frac{\mu_m S}{K_s + S} - k_d \quad (21)$$

- Q/V ifadesi yerine θ hidrolik bekletme süresi yazılabilir.

$$\frac{1}{\theta} = \frac{\mu_m S}{K_s + S} - k_d \quad (22)$$

- (22) ifadesinde $S/K_s + S$ ifadesi çekilir ve μ_m ifadesi yerine $Y \cdot k$ yazılırsa şu denklem elde edilir:

$$\frac{S}{K_s + S} = \left(\frac{1}{\theta} + k_d \right) \left(\frac{1}{Yk} \right) \quad (23)$$

Mikroorganizma için Kütle Dengesi

- (23) ifadesinde eğer S ifadesi çekilecek olursa çıkış substrat konsantrasyonu S şu denklemle bulunur:

$$S = \frac{K_s (1 + k_d \theta_c)}{\theta_c (Yk - k_d) - 1} \quad (24)$$

- Geri devirsiz reaktörlerde katı bekletme süresi yani çamur yaşı (θ_c), hidrolik bekletme süresine (θ) eşittir.
- Dolayısıyla çamur yaşı şu denklemle hesaplanabilir.

$$\theta_c = \frac{VX}{QX} = \frac{V}{Q} \quad (25)$$

Substrat için Kütle Dengesi

- Biyokütleyle benzer şekilde substrat için de kütle dengesi yazılacak olursa;
- Birikim = Giren – Çıkan + Üretilen/Tüketilen

$$\frac{dS}{dt} V = QS_0 - QS + Vr_{su} \quad (26)$$

- S_0 = girişte çözünür substrat konsantrasyonu,
- S = çıkışta çözünür substrat konsantrasyonudur.

Substrat için Kütle Dengesi

- Bu eşitlikte kararlı durumda $dS/dt = 0$ olduğu kabul edilir, r_{su} ifadesi yerine (8) eşitliğindeki değeri yazılır ve eşitliğin her iki tarafı Q ifadesine bölünürse eşitlik;

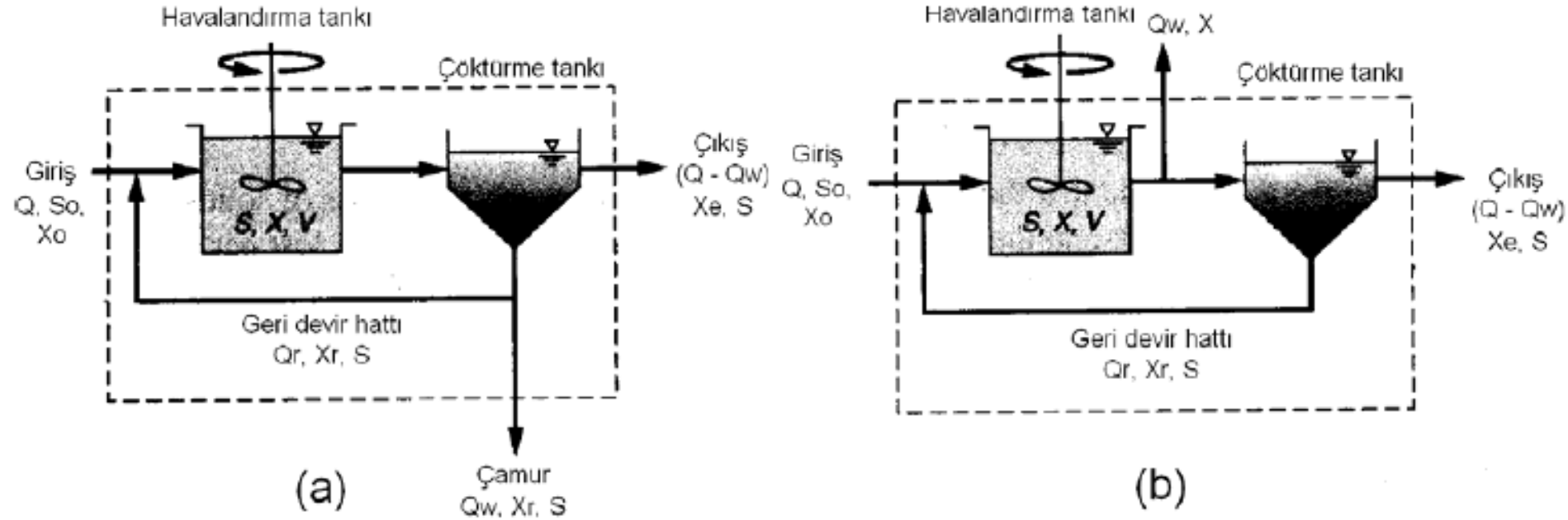
$$(S_0 - S) = \left(\frac{V}{Q} \right) \left(\frac{kXS}{K_s + S} \right) \quad (27)$$

şeklini alır.

- (23) eşitliğindeki $S/K_s + S$ ifadesi (27) denkleminde yerine konular ve V/Q yerine θ yazılır ve X yalnız bırakılırsa çıkış mikroorganizma konsantrasyonu şu denklemlle bulunur.

$$X = \left[\frac{Y(S_0 - S)}{1 + k_d \theta} \right] \quad (28)$$

Geri Devirli ve Tam Karışımli Askıda Büyüyen Prosesler



- Aktif çamur prosesinin şematik gösterimi:
 - (a) geri devir hattından çamur atılması hali,
 - (b) havalandırma tankından çamur atılması hali

Mikroorganizma için Kütle Dengesi

- Net Birikim = Giriş m.o. konsantrasyonu - Çıkış m.o. konsantrasyonu + Net büyüme

$$\frac{dX}{dt} V = QX_0 - [(Q - Q_w)X_e + Q_w X_r] + r_g V \quad (29)$$

- dX/dt = biyokütle konsantrasyonunun değişim hızı, grüçucu askıda katı (VSS)/m³-gün
- V = reaktör hacmi (havalandırma havuzu), m³
- Q = giriş atıksu debisi, m³/gün
- X_0 = giriş biyokütle konsantrasyonu, grVSS/m³
- Q_w = atık çamur debisi, m³/gün
- X_e = çıkış biyokütle konsantrasyonu, g VSS/m³
- X_r = geri devir hattındaki biyokütle konsantrasyonu, grVSS/m³
- r_g = bakteriyel büyüme hızı, gr VSS/m³-gün

Mikroorganizma için Kütle Dengesi

- (29) eşitliğinde giriş biyokütle konsantrasyonu (X_0), çok küçük olduğundan ihmal edilir ve kararlı halde $dX/dt = 0$ olacağı kabul edilirse eşitlik şu şekle dönüşür:

$$(Q - Q_w)X_e + Q_w X_r = r_g V \quad (30)$$

- (30) eşitliği (13) eşitliği ile birleştirilir ve eşitliğin her iki tarafı VX ifadesine bölünecek olursa eşitlik;

$$\frac{(Q - Q_w)X_e + Q_w X_r}{VX} = -Y \frac{r_{su}}{X} - k_d \quad (31)$$

şeklinde gerçekleşir.

Mikroorganizma için Kütle Dengesi

- Eşitliğin sol tarafı ters çevrildiğinde oluşacak ifade katı bekletme süresi (çamur yaşı) olarak ifade edilmektedir.

$$\frac{VX}{(Q - Q_w)X_e + Q_w X_r} = \theta_c \quad (32)$$

– θ_c = katı bekletme süresi, gün' dür.

- Dolayısıyla (31) ifadesindeki çamur yaşı $1/\theta_c$ şeklinde yerine konularak;

$$\frac{1}{\theta_c} = -Y \frac{r_{su}}{X} - k_d \quad (33)$$

ifadesi elde edilir.

Mikroorganizma için Kütle Dengesi

- rsu değeri eşitliğe yazılacak olursa;

$$\frac{1}{\theta_c} = \frac{YkS}{K_s + S} - k_d \quad (34)$$

- Denklem S yalnız kalacak şekilde düzenlenecek olursa, eşitlik;

$$S = \frac{K_s (1 + k_d \theta_c)}{\theta_c (Yk - k_d) - 1} \quad (35)$$

Substrat için Kütle Dengesi

- Birikim = Giren – Çıkan + Üretilen

$$\frac{dS}{dt} V = QS_0 - QS + r_{su} V \quad (36)$$

- S_0 = girişte çözünür substrat konsantrasyonu,
- S = çıkışta çözünür substrat konsantrasyonudur.
- Bu eşitlikte kararlı durumda $dS/dt = 0$ olduğu kabul edilir.
- r_{su} yerine karşılığı yazılacak olursa eşitlik;

$$(S_0 - S) = \left(\frac{V}{Q} \right) \left(\frac{kXS}{K_s + S} \right) \quad (37)$$

Substrat için Kütle Dengesi

- $S/(K_s+S)$ değeri çekilirse ;

$$\frac{S}{K_s + S} = \left(\frac{1}{\theta_c} + k_d \right) \left(\frac{1}{Yk} \right) \quad (38)$$

- Bu değer (37) denkleminde yerine konulur (V/Q) ifadesi yerine hidrolik bekletme süresi olan θ yazılır ve X yalnız bırakılarak denklem düzenlenirse;

$$X = \left(\frac{\theta_c}{\theta} \right) \left[\frac{Y(S_0 - S)}{1 + k_d \theta_c} \right] \quad (39)$$

MLSS, MLVSS ve Biyokütle

- Atıksuyun yanı sıra sistemde üretilen çamurun da reaktöre girdiği görülmektedir. **Giriş atıksu akımı, son çöktürme tankında çöken ve geri devir hattından çekilen çamur** ile karışarak reaktöre verilmektedir. İşte atıksu ile çamur akımının karışımından oluşan reaktör muhtevasına İngilizcede **Mixed Liquor** (ML) denilmektedir.
- Atıksu akımı ve geri devir çamurundaki askıda katı madde konsantrasyonu sonucu oluşan karışıma Mixed Liquor Suspended Solids (MLSS), uçucu askıda katı madde konsantrasyonu sonucu oluşan karışıma ise Mixed Liquor Volatile Suspended Solids (MLVSS) denilmektedir.
- ML ifadesi atıksu ve geri devir çamurunun karıştığı noktadan sonra reaktör ve çöktürme havuzuna kadar olan kısmı kapsamaktadır.

MLSS, MLVSS ve Biyokütle

- Biyokütle yani mikroorganizma konsantrasyonunun bakterilerin sadece organik kısmını ifade ettiği daha önce de belirtilmişti. Bu değer X ifadesi ile gösterilir.
- Dolayısıyla biyokütle konsantrasyonuna, hücre yığınındaki uçucu askıda katı maddelerin ve giriş atıksuyundan gelen ve biyokütle karakterli olmayan uçucu askıda katı maddelerin (nbVSS) eklenmesi ile atıksu ve geri devir çamuru karışımındaki toplam uçucu askıda katı madde konsantrasyonu bulunur.
- Bu konsantrasyon, XT ya da bazen XT, VSS olarak ifade edilen MLVSS'dir.
- MLVSS konsantrasyonuna hücre yığını ve biyokütle içerisindeki inorganik kısımların ve girişten gelen inorganik maddelerin eklenmesi ile atıksu ve geri devir çamuru karışımı içerisindeki toplam askıda katı madde konsantrasyonu bulunur. Bu değer $XTSS$ olarak ifade edilen MLSS'dir.

MLVSS Konsantrasyonu ve Çamur Üretimi

- Biyolojik reaktörlerde sistemin devamlılığı için üretilen katı maddeden (çamur) bir miktarının düzenli olarak atılması gereklidir.
- **TSS**, **VSS** ve biyokütle oluşan çamur miktarını belirlemede kullanılan terimlerdir. Günlük olarak sistemden atılacak çamur, üretilen çamur miktarı ile çamur yaşına bağlı olarak değişir. Dolayısıyla günlük atılan çamur miktarı şu şekilde ifade edilebilir.

$$P_{X_T, VSS} = \frac{X_T V}{\theta_c} \quad (40)$$

Burada;

- P_{X_T} = atılan günlük çamur, **g VSS/gün**
- X_T = MLVSS konsantrasyonu, **g VSS/m³**
- V = havalandırma havuzu hacmi, **m³**

MLVSS Konsantrasyonu ve Çamur Üretimi

- $X_T \cdot V$ ifadesi kütle olarak (g, kg, vs.) sistemdeki toplam uçucu askıda katı madde miktarını vermektedir. Bu eşitlikle bulunan bir günde sistemden atılan toplam çamur miktarıdır.
- Eğer sistemden bir günde atılan biyokütle miktarı belirlenmek istenirse (40) ifadesinde X_T ifadesi yerine X biyokütle konsantrasyonu ifadesi konur. Bu halde (40) eşitliği;

$$P_x = \frac{X \cdot V}{\theta_c} \quad (41)$$

- Havalandırma havuzundaki toplam **MLVSS** konsantrasyonu (X_T), biyokütle konsantrasyonu (X) ile biyolojik olarak parçalanamayan askıda katı madde anlamına gelen **nbVSS** (X_i) konsantrasyonlarının toplamına eşittir.

$$X_T = X + X_i \quad (42)$$

- Sistemde biyokütle **VSS** konsantrasyonu yanında **nbVSS** konsantrasyonu içinde bir kütle dengesi yazmak gerekir. **nbVSS** konsantrasyonu, girişteki **nbVSS** konsantrasyonuna, çıkıştaki **nbVSS** konsantrasyonuna ve hücre ölümü neticesinde oluşan hücre yığını miktarına bağlıdır.

$$\text{Net Birikim} = \text{giriş} - \text{çıkış} + \text{üretim} \quad (43)$$

$$(dX_i/dt)V = QX_{0,i} - X_i V/\theta_c + r_{x,i} V$$

Burada;

- $X_{0,i}$ = girişteki nbVSS konsantrasyonu, **g/m³**
- X_i = çıkış nbVSS konsantrasyonu, **g/m³**
- $r_{x,i}$ = hücre ölümüyle üretilen **nbVSS hızı, g/m³-gün**’dür.

- Kararlı durumda $dX_i/dt = 0$ kabul edildiğinde ve $r_{x,i}$ ifadesi yerine (15) ifadesindeki karşılığı yazıldığında yeni denklem şu şekilde olur:

$$0 = QX_{0,i} - X_i V / \theta_c + (f_d)(k_d)XV \quad (44)$$

$$X_i = X_{0,i} (\theta_c) / \theta + (f_d)(k_d)X \theta_c \quad (45)$$

- (39) ve (45) denklemleri birleştirilirse, ve X_T ifadesi şu şekilde gerçekleşir:

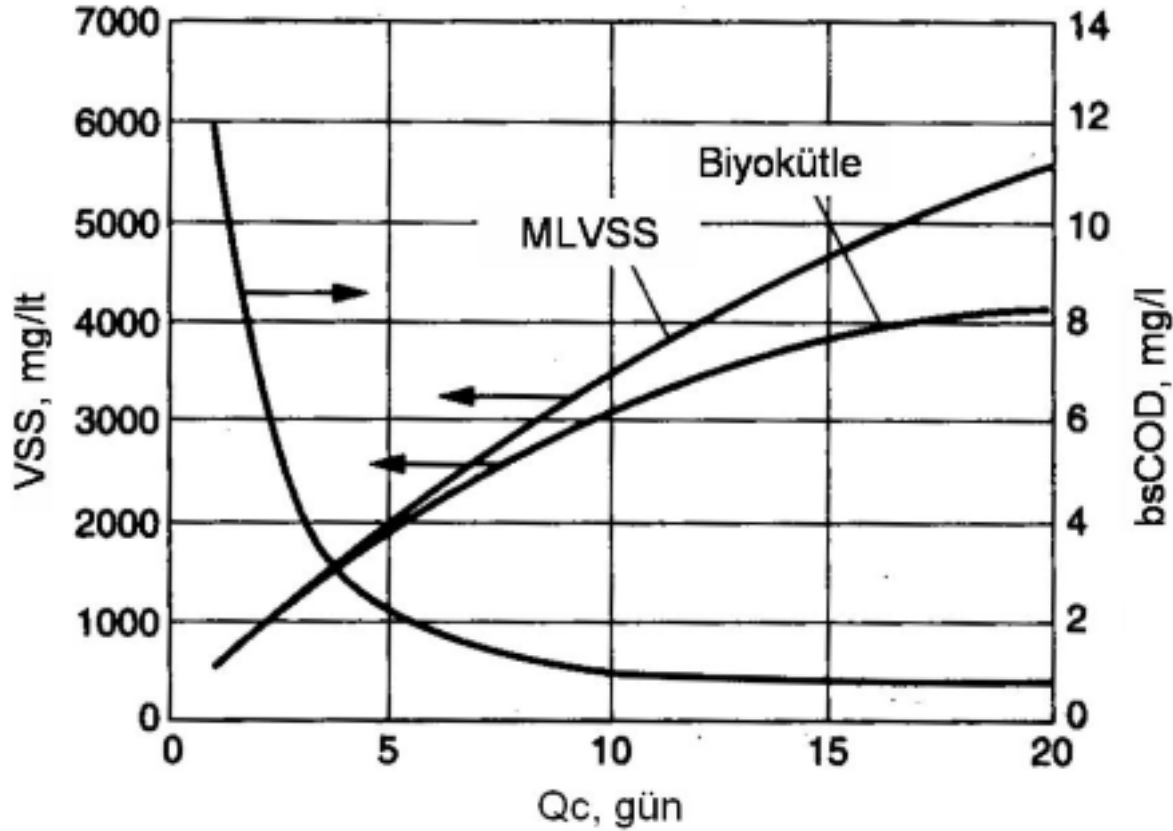
$$X_T = \underbrace{\left(\frac{\theta_c}{\theta} \right) \left[\frac{Y(S_0 - S)}{1 + (k_d)\theta_c} \right]}_{\text{heterotrofik biyokütle (A)}} + \underbrace{(f_d)(k_d)X\theta_c}_{\text{hücre yığılı (B)}} + \underbrace{\frac{(X_{0,i})\theta_c}{\theta}}_{\text{giriş nbVSS (C)}} \quad (46)$$

- Günlük atılan çamur miktarı (40) denkleminde X_T yerine (46) denklemindeki karşılığı yazılarak ve θ yerine V/Q yazılarak elde edilir.

$$P_{X,VSS} = \frac{QY(S_0 - S)}{1 + k_d \theta_c} + f_d(k_d)XV + QX_{0,i} \quad (47)$$

- (39) ifadesindeki X değeri (47) denkleminde yerine konulursa VSS olarak günlük atılan çamur miktarı;

$$P_{X,VSS} = \underbrace{\frac{QY(S_0 - S)}{1 + k_d \theta_c}}_{(A) \text{ Hetetrofik biyokütle}} + \underbrace{\frac{(f_d)(k_d)YQ(S_0 - S)\theta_c}{1 + k_d \theta_c}}_{(B) \text{ Hücre yığı}} + \underbrace{QX_{0,i}}_{(C) \text{ girişteki nbVSS miktarı}} \quad (48)$$



Şekil 13 Aktif çamur sisteminde bsCOD, MLVSS ve biyokütlenin çamur yaşıyla değişimi, (Metcalf ve Eddy, 2003)

MLVSS Konsantrasyonu ve Çamur Üretimi

- Çözünür substrat giderimine çamur yaşının etkisi **Şekil 13**'de görülebilir.
- Çözünür substrat konsantrasyonuna ilaveten toplam **MLVSS** konsantrasyonuna **nbVSS**' de dahildir.
- **θ_c** arttıkça daha fazla biyokütle solunumla tüketilir ve hücre yığıını oluşumu artar.
- Dolayısıyla **MLVSS** ile biyokütle arasındaki farklılık **θ_c** arttıkça fazlalaşır.

MLVSS Konsantrasyonu ve Çamur Üretimi

- Günlük olarak atılacak çamur miktarı **TSS** konsantrasyonuna bağlıdır. **TSS**, biyokütle yanı sıra inorganik partikülleri de içerir.
- Giriş atıksuyunda genel olarak inorganik katıların yüzdesi toplam kuru ağırlık içerisinde yaklaşık **%10-15** civarında olup, biyokütledede de kuru ağırlık olarak benzer orandadır.
- Eğer **VSS / TSS** oranı **%85** olarak kabul edilirse günlük atılan çamur miktarı şu şekilde hesaplanabilir.

MLVSS Konsantrasyonu ve Çamur Üretimi

$$P_{X,TSS} = \frac{A}{0,85} + \frac{B}{0,85} + C + Q(TSS_0 - VSS_0) \quad (49)$$

- Burada;
- $P_{X,TSS}$ = **TSS** olarak günlük olarak atılan net çamur miktarı, **kg/gün**
- TSS_0 = giriş **TSS** konsantrasyonu **g/m³**
- VSS_0 = giriş **VSS** konsantrasyonu **g/m³**

Gerçek Dönüşüm Oranı Yobs

- Gerçek Dönüşüm Oranı (**Yobs**), giderilen substrat miktarına bağlı üretilen katı madde miktarı olarak tariflenir ve **g TSS / g BOİ** olarak, ya da **g VSS / g BOİ** olarak gösterilir.
- Ölçülen katı madde üretimi sistemden atılan çamur (**40**, **47** ve **48** denklemlerinde **P_x** olarak gösterilen) ile sistemin çıkış suyunda yer alan katı madde miktarının toplamına eşittir.
- Yobs, (**48**) denklemi substrat giderim hızı **$Q(S_0-S)$** ifadesine bölünerek elde edilebilir.

$$Y_{obs} = \frac{Y}{1 + (k_d)\theta_c} + \frac{(f_d)(k_d)(Y)\theta_c}{1 + (k_d)\theta_c} + \frac{X_{0,i}}{S_0 - S} \quad (50)$$

hetetrofik
biyokütle
hücre yığını
girişteki
nbVSS

Burada;

- $Y_{obs} = g \text{ VSS} / g$ giderilen substrat'dır.

Eğer atıksular için girişte **nbVSS**'nin olmadığı düşünülürse formül, aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$Y_{obs} = \frac{Y}{1 + (k_d)\theta_c} + \frac{(f_d)(k_d)(Y)\theta_c}{1 + (k_d)\theta_c} \quad (51)$$

Oksijen Gereksinimi

Aerobik arıtmada oksijenin organik maddelerin oksidasyonunda kullanıldığı daha önce belirtilmişti.

Eğer atıksudaki biyolojik olarak parçalanabilir maddelerin **KOİ**'si (**bCOD**) miktarı tamamen okside olmuş olsaydı kullanılan oksijen miktarı **bCOD** miktarına eşit olurdu.

Ancak bakteriler **bCOD**' nin bir kısmını okside ederken bir kısmını da yeni hücre sentezi için kullanırlar.

Dolayısıyla kullanılan oksijen miktarı giderilen **bCOD** miktarının atık çamurun **KOİ**' sinden farkı olarak karşımıza çıkar.

Oksijen kullanımı = bCOD giderilen – atık çamur bCOD konsantrasyonu

$$R_0 = Q(S_0 - S) - 1,42 P_{x,bio} \quad (52)$$

Burada;

- R = gerekli oksijen miktarı, **kg/gün**,
- $P_{x,bio}$ = her gün atılan **VSS** olarak biyokütle, **kg/gün**'dür.

5) Gerçek dönüşüm oranı (Y_{obs}) günlük atılan çamurun, günlük giderilen bsCOD miktarına oranıdır. günlük atılan çamur miktarları VSS/gün ve TSS/gün cinsinden belli olduğuna göre günlük giderilen bsCOD miktarı belirlenmelidir.

$$\text{Giderilen bsCOD/gün} = Q(S_0 - S) = 1000 \text{ m}^3/\text{gün} \cdot (192 \text{ g/m}^3 - 0,56 \text{ g/m}^3)$$

$$\text{Giderilen bsCOD/gün} = 191.440 \text{ g/gün} = 191,44 \text{ kg/gün}$$

Günlük atılan çamur VSS olarak 82,2 kg olduğuna göre;

$$\text{VSS olarak } Y_{obs} = 82,2/191,44$$

$$\text{VSS olarak } Y_{obs} = 0,43 \text{ g VSS/g bsCOD}$$

Günlük atılan çamur TSS olarak 101,4 kg olduğuna göre;

$$\text{TSS olarak } Y_{obs} = 101,4/191,44$$

$$\text{TSS olarak } Y_{obs} = 0,53 \text{ g TSS/g bsCOD}$$

6) Gerekli oksijen miktarı (4.34) denklemi yardımıyla bulunur. Ancak öncelikle bu denklemdeki $P_{X, bio}$ ifadesi bulunmalıdır.

$$P_{X, bio} = P_{XT, VSS} - P_{nbVSS}$$

$$P_{X, bio} = 82,2 \text{ kg/gün} - (1000 \text{ m}^3/\text{gün}) \cdot (30 \text{ g/m}^3) \cdot (1 \text{ kg}/1000 \text{ g})$$

$$P_{X, bio} = 52,2 \text{ kg/gün}$$

$$R_0 = Q(S_0 - S) - 1,42 P_{x, bio}$$

$$R_0 = (1000 \text{ m}^3/\text{gün}) \cdot (192 \text{ g/m}^3 - 0,56 \text{ g/m}^3) \cdot (1 \text{ kg}/1000 \text{ g}) - 1,42 \cdot 52,2 \text{ kg/gün}$$

$$R_0 = 117,7 \text{ kg O}_2/\text{gün}$$

F/M (Food/Microorganism) Oranı

F/M oranı toplam mikroorganizma miktarı başına düşen KOİ veya BOİ miktarı olarak tarif edilir. O halde bu oran, şu denklemle ifade edilebilir:

$$F / M = \frac{QS_0}{VX} \quad (4.35)$$

(4.35) denkleminde Q/V ifadesi yerine $1/\theta$ ifadesi yazılacak olursa;

$$F / M = \frac{S_0}{\theta X} \quad (4.36)$$

olur. Burada; F/M = substratın biyokütleye oranı, g BOİ/g VSS-gün,

X = havalandırma havuzundaki biyokütle konsantrasyonu, g/m³ dür.

Spesifik Substrat Kullanım Oranı (U)

Spesifik substrat kullanım oranı U, F/M oranı ve sistem verimine bağlı olarak aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$U = \frac{(F/M)E}{100} \quad (4.37)$$

Burada, U = spesifik substrat kullanım oranı,

E = sistem verimidir $((S_0-S)/S_0 \times 100)$

Hacimsel Organik Yük (L_{org})

Hacimsel organik yük havalandırma havuzu hacmine 1 günde uygulanan BOİ veya KOİ miktarı olarak ifade edilebilir. O halde;

$$L_{\text{org}} = \frac{QS_0}{V(10^3 \text{ g/kg})} \quad (4.42)$$

Burada; L_{org} = hacimsel organik yük, kg BOİ/m³-gün' dür.

Kinetik Katsayıların Tayini

Kinetik katsayılar atıksu numuneleri içerisindeki belli parametreler sabit tutulup bazı parametreler değiştirilerek tayin edilebilir. Kinetik katsayılar atıksu tipine bağlı olarak değişir. Tablo 5 evsel atıksular için bazı kinetik katsayıların tipik değerlerini vermektedir.

Tablo 5 Girişteki partiküler maddeler ihmal edildiğinde, evsel atıksular için aktif çamur prosesindeki tipik kinetik katsayı değerleri (Crites ve Tchobanoglous, 1998)

Katsayı	Birimi	Değerler*	
		Aralık	Tipik
k	gün ⁻¹	2-10	4
K _s	mg KOİ/L	15-70	40
	mg BOİ ₅ /L	25-100	60
Y	mg VSS/ mg KOİ	0,3-0,6	0,4
	mg VSS/ mg BOİ ₅	0,4-0,8	0,6
k _d	gün ⁻¹	0,02-0,10	0,055

* Değerler 20 °C' de elde edilmiştir.